

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ФИЛИАЛ МГУ В Г. ДУБНЕ



УТВЕРЖДАЮ
И.о. директора
филиала МГУ в г.Дубне
/ Э.Э. Боос /
« 4 » 09 2022 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Теоретическая поддержка современных экспериментов в физике высоких энергий

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Физика элементарных частиц

Форма обучения: Очная форма обучения

Дубна 2022 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки программы магистратуры 03.04.02 «Физика».

Год (годы) приема на обучение _____

Авторы–составители:

1. Доктор физ.-мат. наук Калиновская Лидия Владимировна, профессор физического факультета МГУ по совместительству

Руководитель магистерской программы:

Доктор физ.-мат. наук, профессор академик РАН В.А. Матвеев, заведующий кафедрой физического факультета МГУ

**Аннотация к рабочей программе дисциплины
«Теоретическая поддержка современных экспериментов в физике высоких энергий»**

Курс посвящен углубленному изучению принципов релятивистской квантовой теории поля как одной из важнейших составляющих современной квантовой теории; изучению основных понятий релятивистской теории возмущений, используемой в современной физике высоких энергий для прецизионного расчета наблюдаемых процессов взаимодействия элементарных частиц. Рассматривается применение для теоретической поддержки экспериментов на БАК.

Разделы рабочей программы

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Формат обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Теоретическая поддержка современных экспериментов в физике высоких энергий» реализуется на 1-ом курсе во 2-ом семестре магистратуры и входит в состав вариативной части.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Базовые знания в области общей и теоретической физики в объеме классических университетских курсов

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Результаты обучения
МПК-2 Способен ставить, формализовать и решать задачи в области физики элементарных частиц	ИМПК-2.1 Знает специфику организации научной деятельности в области физики элементарных частиц	З-1 Знать: теоретические основы физики высоких энергий, такие как лагранжиан стандартной модели, регуляризация, нарушения симметрии У-1 Уметь: вычислять характеристики однопетлевых процессов в физике высоких энергий В-1 Владеть: методами расчета характеристик основных характерных процессов физики высоких энергий

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. Содержание дисциплины

Тема 1. Основы квантовой теории поля.

Основы квантовой теории поля. Пример КЭД. Уравнение Эйлера-Лагранжа. Пример КЭД. Проблемы с квантованием. Фиксация калибровки и духовые поля в КЭД. Пропагатор фотона. Вывод пропагатора фотона в калибровке с кси не равным 1.

Тема 2. Калибровочная инвариантность.

Калибровочная инвариантность, $SU(N)$. Локальная $U(1)$ инвариантность. Глобальная не-Абелева симметрия. $SU(2)$ триплеты. Глобальные $SU(3)$ преобразования. Λ -матрицы. Сохраняющиеся токи и заряды. Не-Абелева $SU(2)$ симметрия. Преобразования W -полей. $SU(2)$ заряд. Обобщение КЭД Лагранжиана $-1/4F.F$.

Тема 3. Спонтанное нарушение симметрии.

Спонтанное нарушение симметрии. Мотивации. Пропагатор тяжелого векторного бозона в ультрафиолетовом режиме. Роль продольной поляризации тяжелого векторного бозона. Спонтанное нарушение глобальной $U(1)$ симметрии. Спонтанное нарушение локальной $U(1)$ симметрии: Абелева модель Хиггса. Спонтанное нарушение $SU(2) \times U(1)$ симметрии.

Тема 4. Лагранжиан СМ.

Лагранжиан СМ в R-кси калибровке. Янг-Миллсовский и скалярный секторы. Необходимость фиксации калибровки. Вывод пропагаторов скалярных и векторных бозонов в R-кси калибровке. Фиксация калибровки и духи Фадеева-Попова. Скалярный сектор и головастики. Взаимодействие фермионов с калибровочными и скалярными полями. Фермионное смешивание.

Тема 5. Размерная регуляризация.

Размерная регуляризация и редукция Пассарино-Вельтмана. Основы размерной регуляризации. Подсчет расходимостей. A, B, C-функции и тензорная редукция. Скалярные функции. Интерактивные уроки по редукции A, B, C-функций. D-функции и тензоры. Антискаляризация и J-функции. Интерактивные уроки по D и J-функциям.

Тема 6. Вычисление однопетлевых диаграмм.

Вычисление однопетлевых диаграмм в КЭД. Фотонная и электронная собственная энергия, вершины и боксы. Интерактивные уроки по вычислению первых трех типов диаграмм. Безмассовый мир.

Тема 7. Основы теории перенормировок.

Основы теории перенормировок. Суммирование Дайсона. Лагранжиан контрчленов. Перенормировка в КЭД. Три условия фиксации контрчленов. Интерактивные уроки: Фотонная перенормировка; Электронная перенормировка. Дисперсионные соотношения и фотонная поляризация вакуума. Перенормировка в СМ, и фиксация контрчленов.

Тема 8. Некоторые современные методы.

Методика расчета сечения процесса методом спиральных амплитуд. Методика расчетов наблюдаемых с помощью пакета CalcHEP. Современные методы ROOT Analysis.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетны	объем учебной нагрузки в ак. часах		
		Общая	в том числе ауд.занятий	Самост

	х единица х	трудое мкость	Общая аудио рная нагруз ка	Ле кц ий	Се ми нар ов	Учебн о- практи ческие заняти я	оательн ая работа студент ов
Теоретическая поддержка современных экспериментов в физике высоких энергий	2	72	34	17	17		38

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Теоретическая поддержка современных экспериментов в физике высоких энергий» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса; семинарские занятия, предусматривающие углубленное изучение и обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ тем ы		Виды учебной нагрузки и их трудоёмкость, часы					Са мо ст оя те ль на я ра бо та	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Вс его ча со в	Л е к ц и и	С е м и н а р ы	Учебно- практичес кие занятия (лаборато рные или практичес кие занятия)			
1	Основы квантовой теории поля	8	2	2		4		
2	Калибровочная инвариантность	8	2	2		4		
3	Спонтанное нарушение симметрии	8	2	2		4		
4	Лагранжиан СМ	8	2	2		4		
5	Размерная регуляризация	8	2	2		4		
6	Вычисление однопетлевых диаграмм	8	2	2		4		

7	Основы теории перенормировок	8	2	2		4	
8	Некоторые современные методы	10	3	3		4	
	Промежуточная аттестация	6				6	экзамен
ИТОГО:		72	1 7	1 7		38	

ДЗ- домашнее задание, Оп- опрос, КР- контрольная работа, Т- тестирование, Реф - реферат

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Теоретическая поддержка современных экспериментов в физике высоких энергий» осуществляется на лекциях и семинарских занятиях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теоретическая поддержка современных экспериментов в физике высоких энергий» проводится во втором семестре в форме экзамена.

Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний аспиранта по изученной теме.	Образцы тестов
Оценочные средства промежуточной аттестации		

Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2/ неудовлетворительно	3/ удовлетворительно	4/ хорошо	5/ отлично
ЗНАТЬ: теоретические основы физики высоких энергий, такие как лагранжиан стандартной модели, регуляризация, нарушения симметрии ИМПК-2.1	Отсутствие знаний теоретических основ физики высоких энергий, таких как лагранжиан стандартной модели, регуляризация, нарушения симметрии	В целом успешные, но не систематические знания теоретических основ физики высоких энергий, таких как лагранжиан стандартной модели, регуляризация, нарушения симметрии	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания теоретических основ физики высоких энергий, таких как лагранжиан стандартной модели, регуляризация, нарушения симметрии	Успешные и систематические знания теоретических основ физики высоких энергий, таких как лагранжиан стандартной модели, регуляризация, нарушения симметрии
УМЕТЬ: вычислять характеристики однопетлевых процессов в физике высоких энергий ИМПК-2.1	Отсутствие умения вычислять характеристики однопетлевых процессов в физике высоких энергий	В целом успешное, но не систематическое умение вычислять характеристики однопетлевых процессов в физике высоких энергий	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение вычислять характеристики однопетлевых процессов в физике высоких энергий	Успешное и систематическое умение вычислять характеристики однопетлевых процессов в физике высоких энергий
ВЛАДЕТЬ: методами расчета характеристик основных характерных процессов физики высоких энергий ИМПК-2.1	Отсутствие/фрагментарное владение методами расчета характеристик основных характерных процессов физики высоких энергий	В целом успешное, но не систематическое владение методами расчета характеристик основных характерных процессов физики высоких энергий	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами расчета характеристик основных характерных процессов физики высоких энергий	Успешное и систематическое владение методами расчета характеристик основных характерных процессов физики высоких энергий

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся

Пример:

Вопросы по теории:

1. Спонтанное нарушение симметрии
2. Калибровочная инвариантность

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Экзамен проводится в виде письменной работы с последующим собеседованием по изучаемым темам.

Материалы промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к экзамену:

Тема I) Методика расчета сечения процесса методом спиральных амплитуд.

Задание 1)

Расчёт спиральных амплитуд для процессов $2 \rightarrow 2$ с использованием формализма Вейля-ван-дер-Вардена для определенного процесса.

Список процессов:

$e^- e^+ \rightarrow \gamma \gamma$, $e^- e^+ \rightarrow HZ$, $e^- e^+ \rightarrow Z \gamma$, $e^- e^+ \rightarrow \mu^- \mu^+$, $\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$, $e^- e^+ \rightarrow W^+ W^-$

- 1) нарисовать все древесные диаграммы Фейнмана для данного процесса;
- 2) используя правила Фейнмана, приведённые в справочнике, правильно написать выражение для матричного элемента;
- 3) используя методические материалы, выразить волновые функции внешних частиц через вейлевские спиноры;
- 4) используя тождества Фирца, вычислить все свёртки по лоренцевским индексам;
- 5) переписать амплитуду в терминах спинорных произведений, выполнить упрощения, основанные на элементарных свойствах спинорных произведений.

Тема II) Методика расчетов наблюдаемых с помощью пакета CalcHEP.

Задание 2.

Вычислить сечение процесса $pp \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ при $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$

и следующими кинематическими ограничениями:

$|\eta(\mu^-)| < 2.4$, $|\eta(\mu^+)| < 2.4$, $60 \text{ GeV} < M(\mu^+ \mu^-) < 120 \text{ GeV}$,

$p_T(\mu^-) > 20 \text{ GeV}$, $p_T(\mu^+) > 20 \text{ GeV}$, $E(\gamma) > 1 \text{ GeV}$.

Построить распределение по $M(\mu^+ \mu^-)$ в диапазоне от 60 GeV до 120 GeV.

Повторить вычисления, отключив излучение фотона из начального/конечного состояния.

Сравнить результаты.

Задание 3.

Вычислить сечение процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$ при $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ и следующими кинематическими ограничениями:
 $|\cos(\theta_-)| < 0.9$, $|\cos(\theta_+)| < 0.9$, $E(\gamma) > 1 \text{ GeV}$.
Построить распределение по $\cos(\theta_-)$ в диапазоне от -0.9 до 0.9.
Повторить вычисления, отключив диаграммы с Z-бозоном.
Сравнить результаты.

Задание 4.

Вычислить сечение поляризованного процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- \gamma$ при $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$ с начальными поляризациями (+0.5, -0.5) и (-0.5, +0.5) и следующим кинематическим ограничением: $E(\gamma) > 1 \text{ GeV}$.
Построить распределение по $\cos(\theta_-)$ в диапазоне от -1.0 до 1.0 для двух выборок начальных поляризаций и распределение для асимметрии A_{LR} .

Тема III) Современные методы ROOT Analysis

Framework: The functionalities of RDataFrame: ROOT's declarative analysis interface.

Задание 5:

Фитирование гистограмм. Получение минимума хи-квадрата.
Сохранить root-файл у себя в директории.
Написать скрипт, открывающий файл, считывающий из файла древесную структуру `ntuple`. Построить распределения инвариантной массы бозона Хигса и топ кварка.
Определить параметры распределения отфитированных суммой гауссиана и полиномом 3-ой степени.

(M_H, σ_H определяются из распределения инвариантной массы бозона Хигса; M_t, σ_t определяются из распределения инвариантной массы топ кварка).

Задание 6.

Получить выборку событий. Построить соответствующую гистограмму.

Сохранить root-файл у себя в директории.

Написать скрипт открывающий файл и считывающий из файла древесную структуру `ntuple`.

Построить `CutFlow` событий после применения каждого `CUT`, т.е. построить выборку событий.

Список выборки:

1. наличие 2 лептонов одного знака в событии,
2. наличие 1 τ мезона в событии,
3. наличие более 4 струй в событии,
4. наличие более 1 b -струи в событии,
5. наличие недостающей энергии более 30 ГэВ.

Гистограммы взвесить и нормировать на заданую светимость. Полученные плотности сохранить в файл.

Задание 7.

Skimming.

Сохранить root-файл у себя в директории.

Написать скрипт, открывающий root-файл, считывающий из root-файл древесную структуру ntuple, удалить не используемые ветки деревьев.

К оставшимся применить каты позволяющие сильно сократить размер входного root-файл.

Результат skimming-а сохранить в выходном файле.

Сравнить вес входящего и входящегося root-файлов.

Список веток, которые надо сохранить:

1. passEventCleaning,
2. nTaus_OR_Pt25,
3. pass_SS_2L,
4. pass_tight_2L,
- 5 nJets_OR_T,
6. nJets_OR_T_MV2c10_70,
7. nTaus_OR_Pt25,
- 8.tau_isHadronic_0,
- 9.tau_truthType_0,
10. tau_truthJetFlavour_0.

Список катов, которые надо применить:

```
pass_SS_2L == 1,  
nTaus_OR_Pt25 ==1,  
nJets_OR_T > 0,  
tau=isHadronic_0==1,  
nJets_OR_T_MV2c10_70>0.
```

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература

1. С.М. Биленький, "Введение в диаграммы Фейнмана и физику электрослабого взаимодействия", М. Энергоатомиздат, 1990г.
2. М. Пескин, Д. Шредер, "Введение в квантовую теорию поля", РХД, 2001г.
3. Т. Banks, "Modern Quantum Field Theory: A Concise Introduction", Cambridge, Cambridge University Press, 2008г

Дополнительная литература

1. М. Srednicki, "Quantum Field Theory", Cambridge, Cambridge University Press, 2007г

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Операционная система Astra Linux (<https://astralinux.ru/>) или аналог, с офисным пакетом, с пакетами разработчика.

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. База данных РИНЦ (российский индекс научного цитирования) <http://www.elibrary.ru>

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика», курс может быть прочитан в поточной аудитории при

наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.